

P- σ 全球模式的月尺度动力 延伸预报试验*

钱永甫 郑 琼

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

摘 要 用 P- σ 混合坐标系原始方程模式 (Nju-P σ M), 以观测的瞬时气象要素场作为模式初始场, 作了 24 个月动力延伸预报试验。利用距平符号一致率 (P)、距平相关系数 (AC) 和均方根误差 (RMS) 对预报结果进行了评估和分析。试验表明 Nju-P σ M 对月平均环流有一定的预报能力, 气候漂移订正和预报结果的线性、抛物线型两种合成方法都对预报效果有明显的改进。把动力延伸预报与年际和月际持续性预报进行对比后, 表明动力预报结果的各项评估分均为最高。预报场和实况场的空间滤波和经验正交函数 (EOF) 分析表明, 模式对大尺度天气系统的预报能力较强, 而对较小尺度天气系统的预报能力则差一些。

关键词: 全球气候模式; 动力延伸预报; 预报评估与诊断

1 引言

短期气候变化一般指月、季尺度的气候变率及气候异常。它对国民经济和人民的生命财产会产生很大的影响, 因此国内外对短期气候预测都很重视, 而动力延伸预报是短期气候预测的重要组成部分。

从 20 世纪 70 年代中后期开始, 国内外用大气环流模式 (GCM) 作月平均环流预报方面已进行了大量的试验^[1~4]。从试验结果看, 500 hPa 月平均高度场预报与观测的距平相关系数始终在 0.25~0.40 之间, 且月平均高度场的预报技巧主要依靠前 10 d 的逐日预报水平^[1]。Van den Dool 对国家气象中心 (NMC) 的动力延伸预报模式所做的 128 个积分 90 d 的试验进行了详细分析, 总体平均的相关系数也远达不到业务应用水平 (0.5), 因此在月尺度动力延伸预报方面还有许多问题有待进一步研究^[4]。

本文用南京大学 P- σ 混合坐标系原始方程模式 (Nju-P σ M)^[5,6], 进行了 24 个个例的月时间尺度动力延伸预报试验, 以评估该模式进行短期气候变化预测的能力, 研究了预报结果的处理方法对预报效果的影响。并用空间滤波和经验正交函数 (EOF) 分析方法讨论了模式对不同尺度大气运动的预报性能。

2 模式和初始资料

本文所用的南京大学 P- σ 混合坐标系原始方程模式 (Nju-P σ M), 是一个海-地-

1999-12-17 收到, 2000-06-17 收到再改稿

* 国家自然科学基金资助项目 49735170

气初步耦合的模拟系统。它包含 3 个子模式：大气模式、土壤模式和海洋热力模式。大气模式在垂直方向采用 $P-\sigma$ 混合坐标系。各种物理过程，如太阳辐射和地气系统长波辐射、大尺度和对流尺度凝结等，均包含在模式中。太阳辐射还具有季节变化和日变化。模式采用了真实的地形，在模式范围内有 6 种陆地下垫面，即粘土牧草地、热带雨林、沙漠、沼泽湿地、雪面和冰面。模式采用经纬度网格，格距均为 5° ，水平范围为全球，时间积分步长 15 min。有关 3 个子模式的详细情况见参考文献[5,6]。

模式的初始场由 NCEP (National Center for Environmental Prediction) 的再分析资料给出，选取 1993 年 12 月~1995 年 11 月各月最后一天 00 时的瞬时高度、温度和湿度场作为初始场，各积分一个月，可获得 1994~1995 年各月的预报场。初始场的水平分辨率为 $5^\circ \times 5^\circ$ ，垂直方向取 7 层：即 100、200、300、500、700、850 和 1000 hPa。

初始时刻模式层上的温度、高度和比湿用插值法给出，风分量场用地转关系和低纬的简化平衡关系求出。由于模式包含日变化，月平均动力预报场取为积分时段内每小时累加结果的平均场。海温初始场采用相应月份的多年月平均气候场。

3 预报试验的结果评估

3.1 无气候漂移订正的预报结果评估

分别选用预报场与实况场的距平符号一致率 (P)、距平相关系数 (AC) 和均方根误差 (RMS) 为评估的依据。所用的实况场为 NCEP 再分析资料的 1994、1995 年各月平均高度场，及其相对于该资料中 1986~1995 年 10 年平均的月平均高度场的距平。首先来看无气候漂移订正的结果。表 1 为 1994 和 1995 年北半球 ($0 \sim 85^\circ\text{N}$) 300、500 和 700 hPa 月预报高度距平场的符号一致率、距平相关系数和均方根误差。由表可见，对不同的个例，相关系数、距平符号一致率和均方根误差都相差较大，且高低层的情况也甚不相同。从距平符号一致率来看，1994 年好于 1995 年，300 和 500 hPa 的年平均 P 值分别为 0.597 和 0.566，高于 1995 年的 0.5 和 0.512，但 1995 年 700 hPa 年平均 P 值略高于 1994 年。从相关系数和均方根误差来看，1995 年预报的平均情况要远好于 1994 年。1994 年 500 hPa 的 AC 有 6 个月的相关系数为负，最好的月份也只达到 0.35，年平均为 -0.008，而 1995 年 500 hPa 的 AC 最高达 0.497，12 个月的相关系数都为正，年平均达 0.267。在王绍武等人^[1]用统计模式作的 15 年预报结果中，也发现 1994 年是很特殊的一年，预报结果比其他年份差。用气候平均的海面温度 (SST) 作为模式的强迫场可能是造成 1994 年和 1995 年预报效果不同的原因之一。此外，1994 年的 P 值高于 1995 年，而 AC 及 RMS 的值不如 1995 年，说明 1994 年月平均场上的高低压中心不如 1995 年预报得好。

3.2 气候漂移订正后的预报结果评估

由于大气中较小尺度扰动内在的不稳定性和大气环流数值模式的不完善，一般来说，当大气环流模式由实际的初始场进行模式积分时，系统误差就会发展，由大量的积分实例所确定的模式气候（长时间积分结果）与相应的气候实况并不一致，这种系统误差称之为模式的气候漂移。Nju- $P\sigma$ M 也存在着气候漂移，明显地表现在：各层预报场

表 1 北半球 300、500、700 hPa 月预报高度场的距平符号一致率 (P)、距平相关系数 (AC) 和均方根误差 (RMS 位势什米)

时间		300 hPa			500 hPa			700 hPa		
		P	AC	RMS	P	AC	RMS	P	AC	RMS
1994 年	1 月	0.570	0.336	22.50	0.610	0.354	14.873	0.707	0.527	9.171
	2 月	0.549	0.019	21.05	0.548	0.108	14.015	0.566	0.177	8.943
	3 月	0.629	-0.071	22.69	0.583	-0.106	15.588	0.441	-0.047	10.395
	4 月	0.518	0.143	20.89	0.471	-0.003	16.121	0.372	-0.100	11.511
	5 月	0.600	0.210	42.84	0.596	-0.116	28.679	0.485	0.034	17.183
	6 月	0.658	0.111	18.19	0.662	0.122	13.468	0.630	0.056	9.916
	7 月	0.711	-0.048	14.66	0.708	-0.167	11.119	0.681	-0.205	8.487
	8 月	0.617	-0.198	16.21	0.603	-0.314	11.484	0.504	-0.334	8.601
	9 月	0.637	0.109	18.25	0.566	0.051	12.622	0.509	0.115	8.878
	10 月	0.660	0.209	19.77	0.613	0.110	13.029	0.533	0.024	8.502
	11 月	0.613	-0.067	21.39	0.465	-0.170	13.590	0.354	-0.170	8.939
	12 月	0.396	-0.046	24.72	0.363	0.030	16.676	0.340	0.030	11.039
	平均	0.597	0.059	21.93	0.566	-0.008	15.105	0.510	0.009	10.13
时间		300 hPa			500 hPa			700 hPa		
		P	AC	RMS	P	AC	RMS	P	AC	RMS
1995 年	1 月	0.436	0.337	21.094	0.439	0.369	13.051	0.441	0.310	8.006
	2 月	0.512	0.150	19.062	0.414	0.086	12.611	0.367	-0.052	8.045
	3 月	0.543	0.200	20.910	0.576	0.422	13.824	0.669	0.522	7.670
	4 月	0.424	0.354	20.045	0.525	0.396	13.815	0.593	0.351	9.036
	5 月	0.419	0.144	17.627	0.392	0.229	12.516	0.408	0.265	8.559
	6 月	0.408	0.008	17.014	0.404	0.091	11.482	0.467	0.103	7.768
	7 月	0.650	0.251	16.439	0.691	0.274	12.104	0.684	0.296	9.032
	8 月	0.393	0.157	17.191	0.523	0.112	12.849	0.642	0.090	9.919
	9 月	0.394	0.272	18.750	0.397	0.264	12.367	0.431	0.222	8.558
	10 月	0.498	0.042	23.855	0.588	0.248	16.207	0.600	0.374	11.460
	11 月	0.637	0.506	20.212	0.629	0.497	12.771	0.590	0.496	8.397
	12 月	0.691	0.250	21.328	0.567	0.221	14.016	0.471	0.131	9.199
	平均	0.500	0.223	19.461	0.512	0.267	13.134	0.530	0.259	8.804

的等值线梯度比实测场弱, 高纬地区等压面高度偏高, 极区极地低涡偏浅, 低纬地区等压面高度偏低, 副热带高压偏弱。这也是目前几乎所有模式普遍存在的问题。

为了从积分结果中得到更加有用的预报信息, 应当去掉系统误差。去掉系统误差的根本办法是找出产生气候漂移的原因, 改进模式。但这一点不是立即可以做到的, 也许需要几十年艰苦的努力。另一种办法是长时间积分模式, 取模式的平衡态作为模式的气候平均态, 用预报结果减去模式平均态表示预报的距平, 但这要化费很多的计算时间, 而且, 由于积分时间长度的不同, 气候漂移的程度也不同。所以我们采用一种简化的方法: 即以上月平均气候场作为初始场, 积分得到下月气候场, 将相应月的预测场与该气候场的偏差作为经气候漂移订正后的预测距平场, 然后与实际月距平场进行比较。这样做不但节省了计算时间, 而且由于积分时间相同, 气候漂移的程度也应基本相同, 订正的效果可能更好。

表 2 给出了 1994、1995 年 1 月和 7 月及年平均的月平均 500 hPa 预报距平与实况距平沿纬圈差值。可见未进行气候漂移订正时, 1 月和 7 月的纬圈差值几乎全部为负值, 对于年平均, 1994 年均均为负值, 1995 年高纬为正值, 其余为负值。显然, 这是模式系统性误差 (即气候漂移) 的反映。进行气候漂移订正后, 预报距平与实况距平的纬圈差值的量值要比订正前小得多, 且分布较均匀, 正负差值都存在, 但 1995 年年均差值在高纬地区有所增大。可见这种方法在一定程度上消除了模式的系统误差, 尤其是在低纬。但是, 即使进行气候漂移订正后, 也还有一定程度的系统性偏差。

表 2 500 hPa 高度距平预报场与实况场的纬圈平均差值 (位势什米)

纬度	无气候漂移订正						有气候漂移订正					
	1994 年			1995 年			1994 年			1995 年		
	1 月	7 月	平均	1 月	7 月	平均	1 月	7 月	平均	1 月	7 月	平均
0	-15.31	-10.94	-13.178	-14.20	-11.73	-12.46	1.32	1.29	0.67	2.44	0.50	1.389
5	-16.32	-11.14	-13.387	-15.30	-11.91	-12.678	1.39	1.51	1.183	2.41	0.74	1.892
10	-18.10	-11.36	-14.076	-17.10	-12.30	-13.322	1.64	1.69	1.601	2.64	0.75	2.354
15	-19.60	-12.63	-15.043	-18.61	-13.44	-14.219	0.89	1.58	1.612	1.88	0.77	2.436
20	-20.73	-13.45	-15.841	-19.62	-14.82	-14.841	-0.13	2.02	1.586	0.98	0.66	2.586
25	-19.38	-14.59	-15.654	-17.83	-16.35	-14.241	-1.27	2.22	1.362	0.28	0.46	2.775
30	-17.19	-15.69	-14.78	-14.21	-17.18	-12.505	-2.01	1.94	1.079	0.97	0.45	3.492
35	-13.75	-16.04	-12.867	-9.40	-16.71	-9.554	-2.25	1.39	0.835	2.10	0.72	4.148
40	-10.77	-14.59	-10.258	-5.99	-14.58	-6.078	-2.69	0.75	0.854	2.08	0.77	5.034
45	-7.48	-11.10	-6.883	-4.44	-11.04	-2.966	-2.53	1.41	1.36	0.51	1.46	5.274
50	-5.21	-6.37	-3.919	-4.66	-7.12	-0.674	-2.03	3.23	1.823	-1.48	2.48	5.067
55	-3.75	-4.14	-2.385	-5.65	-4.18	0.687	-0.40	3.89	2.084	-2.30	3.85	5.157
60	-3.45	-5.93	-2.419	-6.28	-3.96	1.41	1.04	1.50	1.767	-1.79	3.46	5.596
65	-3.79	-8.11	-2.866	-5.96	-4.91	2.543	0.49	-0.79	0.927	-1.68	2.40	6.321
70	-3.96	-8.21	-2.958	-5.55	-6.15	3.958	-0.42	-0.51	0.304	-2.01	1.55	7.219
75	-6.30	-5.29	-2.661	-3.85	-7.16	5.349	-4.25	2.33	-0.407	-1.80	0.46	7.603
80	-8.87	-1.06	-1.202	-4.07	-9.09	6.527	-8.50	5.88	-0.195	-3.71	-2.16	7.531
85	-12.95	1.87	-0.228	-6.69	-13.33	7.067	-13.7	8.69	0.121	-7.49	-6.50	7.416

图 1 给出了进行气候漂移订正前后 500 hPa 月预报结果的 AC 和 P。可见, 气候漂移订正后, 1994 年几乎所有月份的 AC 都有较大的增加, 特别是 5~9 月, 且原预报效果较差的月份 AC 增加最多, 1995 年各月的 AC 也有所增加。1994 和 1995 年的年平均 AC 分别提高了 0.17 和 0.06。1995 年 P 的提高也很显著, 年平均增加了 0.08, 但 1994 年某些月的 P 值有所下降, 年平均 P 值几乎没有什么改变。可见气候漂移订正对于总体预报水平有明显的改进, 但各月 and 不同评分参数的订正效果并不相同。

3.3 预测结果的合成方法对预测效果的影响

迄今为止, 关于月预报的试验和研究都已指出, 用动力模式作月预报时, 其逐日预报的距平相关系数随时间有迅速下降的趋势。因此, 利用模式逐日结果的算术平均作为预报场毫无疑问会减小相关系数。张道民等^[7]发现利用前 13 d 平均比较好, 而后 20 d 的瞬时动力预报对平均月预报也还存在着有用的信息未被提取。他们还提出了其他几种合成方法, 对于月平均预报有一定的改进效果。

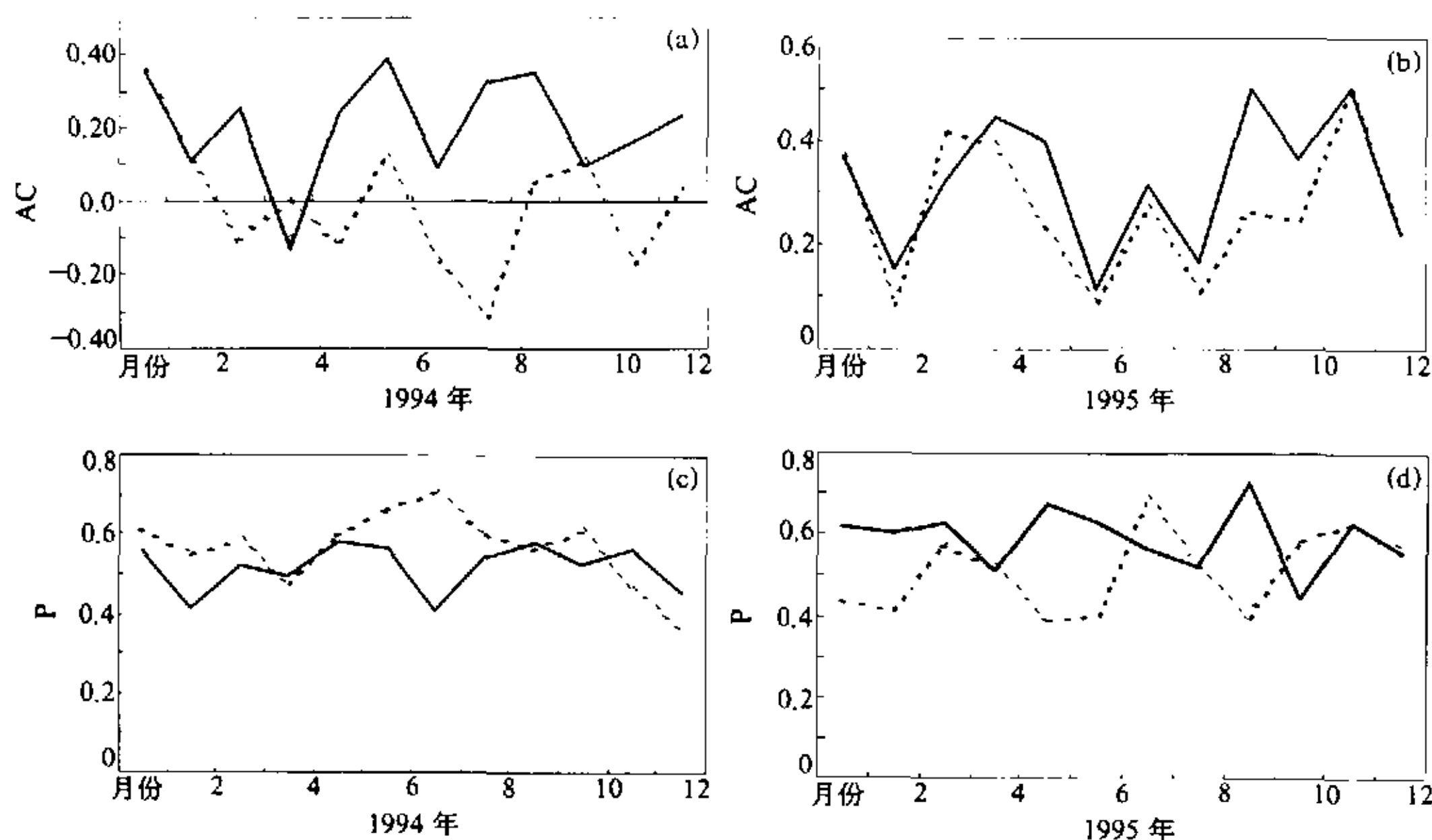


图1 1994年(a)、(c)和1995年(b)、(d)气候漂移订正前(实线)后(虚线)北半球500 hPa月预报结果的AC和P

采用不同权重对月预报场进行合成时, 合成结果可表示为

$$\bar{F} = \sum w_i F_i / \sum w_i, \quad (1)$$

式中 w_i 和 F_i 分别是预报量 F 逐日的权重和数值, $\bar{F}$ 是 F 的月平均值, $i = 1, 2, \dots, M$, M 为月的总日数。参考张道民等人的作法对权重作以下的两种设定:

(1) 考虑到逐日预报通常前期距平相关系数较高, 后期较低, 取线性权重

$$W_i = 1 + (15.5 - i) / 15.5, \quad (2)$$

其中 i 为预报时间(d);

(2) 对各旬预报距平相关系数的分析发现, 有的个例第二旬的距平相关系数较低, 第三旬又有“回升”; 或者预报距平相关系数随时间的变化呈开口向上的抛物线分布, 故取权重为随预报时间先下降而后又上升的抛物线形式

$$W_i = 0.05 + (i - 22)^2 / (50 + i). \quad (3)$$

利用这两种合成方法对1994年和1995年24个预报结果作了检验, 得到的评分结果如表3所示。表3还给出了等权平均的结果, 以作比较。可见, 对于1995年北半球预报而言, 原12个个例月距平预报相关系数平均为0.267, 而(1)、(2)两种合成方法都使月距平预报相关系数有明显的提高, 分别达到了0.287、0.312。对于1994年的预报有更大的提高, 分别增加了0.1和0.05, 且由负相关变为正相关。距平符号一致率也有不同程度的提高。

表 3 北半球 500 hPa 高度场年平均预报不同合成方法的比较

方法	1995 年平均		1994 年平均	
	AC	P	AC	P
方法 (1)	0.287	0.517	0.047	0.574
方法 (2)	0.312	0.522	0.097	0.583
等权平均	0.267	0.512	-0.008	0.566

图 2 为 3 种不同合成方法 (包括等权) 月平均 500 hPa 高度场距平相关系数的比较。对于大部分个例, 两种改进方法的距平相关系数都比简单算术平均方法的距平相关系数高。对于原预报结果较差的月份, 改进更明显。

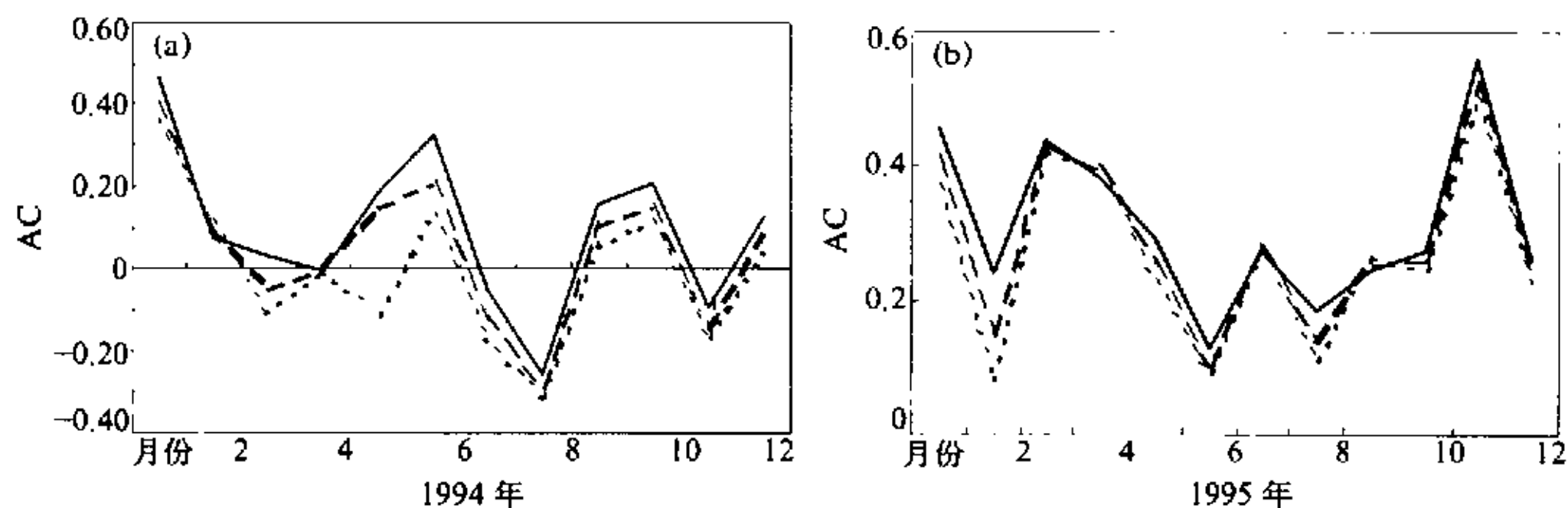


图 2 1994 年 (a) 和 1995 年 (b) 方法 1 (虚线)、方法 2 (实线) 和等权平均 (点线) 合成的北半球 500 hPa 月平均高度场预报结果的相关系数

3.4 与持续性预报的比较

持续性预报也称惯性预报。将上月的实况距平作为本月的预报距平值, 称为月际持续性预报; 将上年同月份的实况距平作为本月的预报距平值, 称为年际持续性预报。图 3 为 1994 年和 1995 年月际和年际持续性预报的各项评估, 为了比较, 也给出了动力预报的各项评估。

从图 3a、b 可见, 月际和年际持续性预报也同样表现出预报效果夏季较差, 冬季较好的特性, 而且平均来说, 各月份都是月际持续性预报好于年际持续性预报。但无论是哪种持续性预报, 都差于动力延伸预报 (1995 年 12 月例外)。符号一致率的情况 (图 3c、d) 与距平相关系数类似, 但 3 种预报之间差异较小, 平均来说, 仍是动力预报好于月际和年际持续性预报。对于均方根误差 (图 3e、f), 年际持续性预报比月际持续性预报小, 但又略大于动力预报, 只有少数月份如 1994 年 5 月、1995 年 4 月等的 RMS 小于动力预报。4、5 月份正是春季, 是环流的转型期, 这个时期的预报对于延伸预报可能是个难点。

4 对于不同尺度大气运动的预报能力

4.1 空间滤波结果分析

本节利用球谐函数的波谱分析方法, 将 1994 年和 1995 年共 24 个月 500 hPa 高度

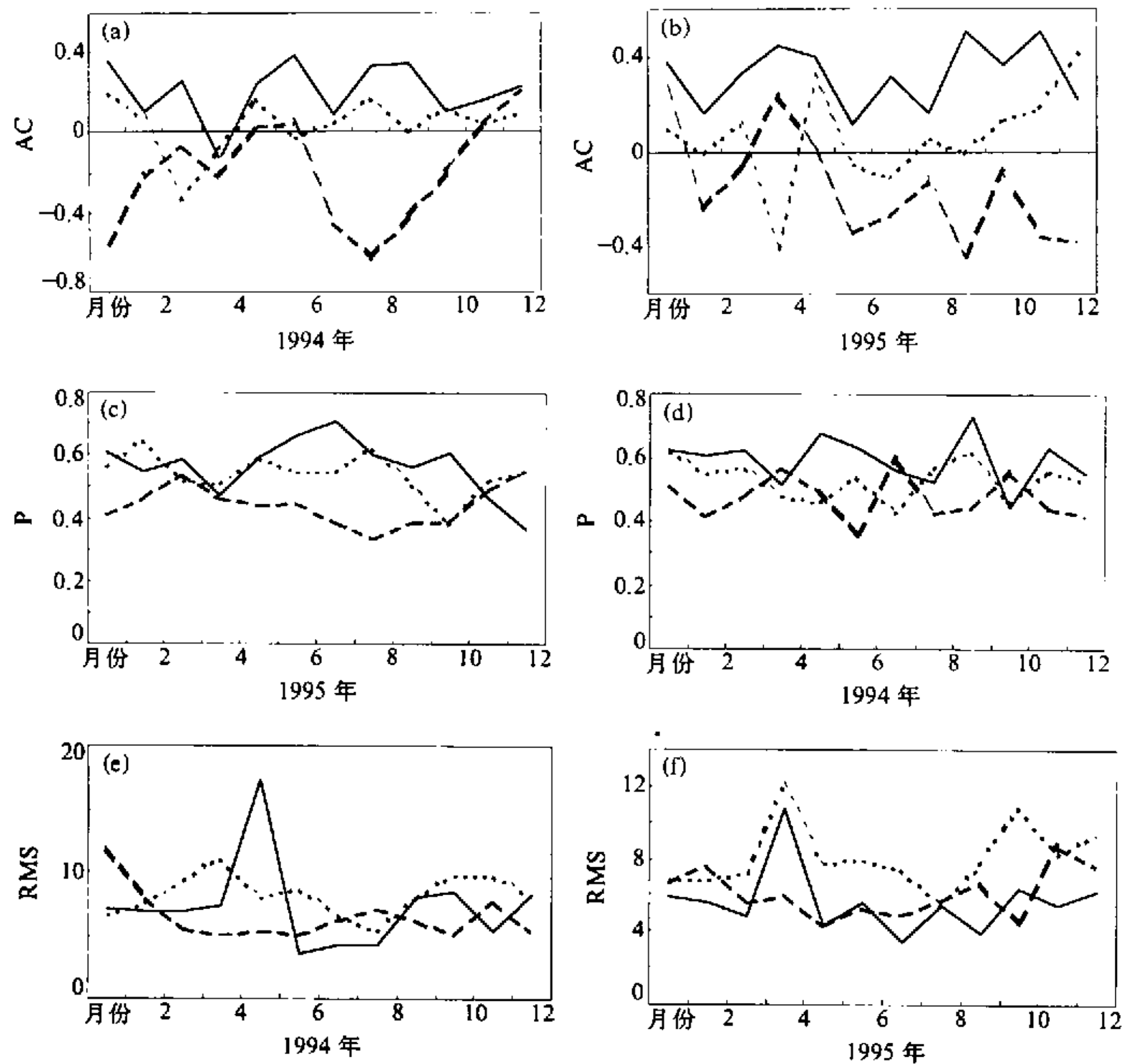


图3 1994年(a)、(c)、(e)和1995年(b)、(d)、(f)的月际(点线)、年际(虚线)持续性预报和动力预报(实线)的各项评估

距平实况和预报场分别进行波谱分解,以讨论预报模式对不同波长波动的预报效果。波谱分解后,截取波数小于或等于5波的部分进行合成,称其为长波部分;从总的场中减去长波部分,余下的就是波数大于5波的部分,称其为短波部分。对预报(已经过气候漂移订正)和实测的月平均距平场分别求长波部分和短波部分的相关性。图4a、b分别为1994年和1995年长波和短波部分预报与实况的相关系数。

由图4可见,长波部分相关系数一般都大于短波部分,1994和1995年长波部分年平均相关系数分别为0.217和0.332,而短波部分年平均相关系数分别只有0.001和0.039。可见长波部分的可预测性要好于短波部分。而且,1994和1995年长波部分年平均的相关系数比整个预报场的相关系数分别提高了0.04和0.01。

4.2 预报结果与实况的EOF分析

分别对1994年和1995年各12个月标准化后的500 hPa预报和实测距平场做了EOF分析。前3个特征向量所占的方差,1994年的实况场分别为0.25、0.16、0.15,

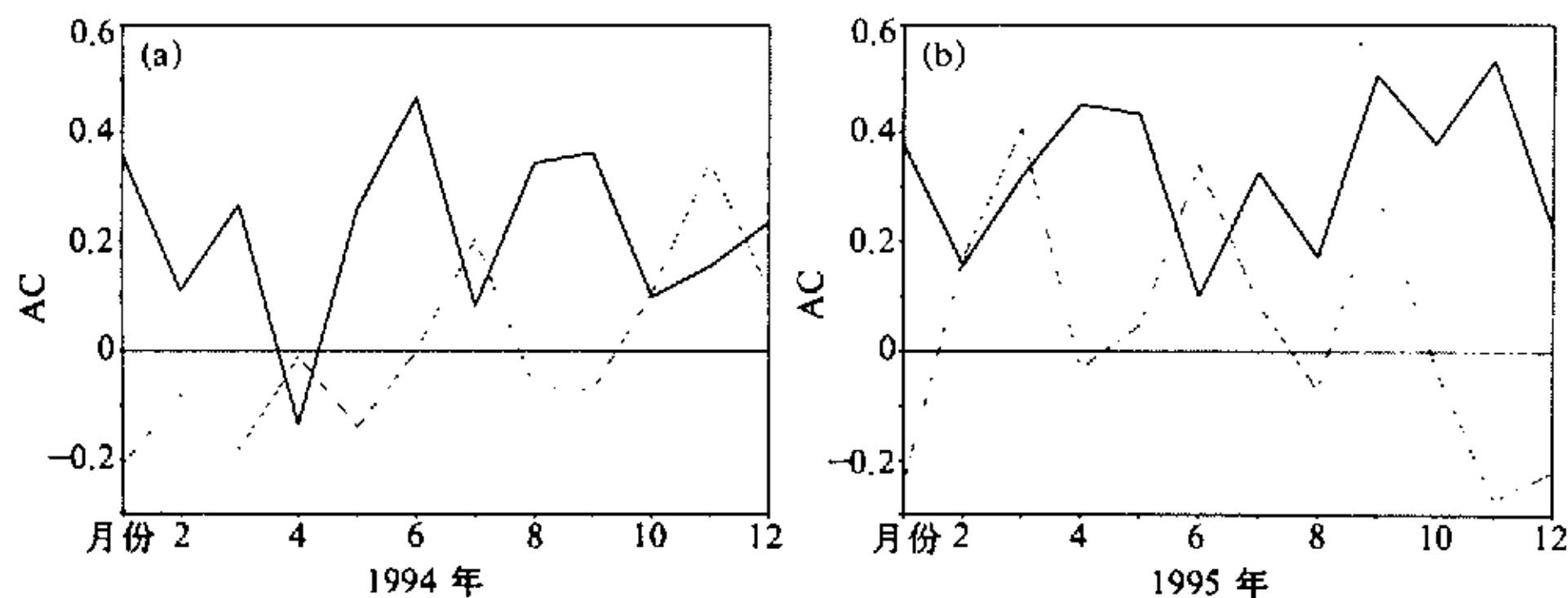


图4 滤波后1994年(a)、1995年(b)北半球500 hPa高度场长波(实线)和短波(虚线)部分月平均的预报与实况距平场的相关系数

1994年的预报场分别为0.55、0.35、0.03, 1995年的实况场分别为0.23、0.18、0.12, 1995年的预报场分别为0.65、0.18、0.06。可见前3个特征向量场可以基本反映北半球500 hPa高度月距平场的主要特征。从它们所占的方差比重来看, 预报场要大于实测场, 可见预报场中主要是大尺度的成分。1995年实况和预报场的第一、第二和第三空间特征向量之间的相关系数分别为0.345、0.161和-0.204。1994年的相关性较差, 相关系数分别是0.170、-0.061、-0.248。EOF分析第一空间特征向量主要反映了尺度较大波动的特征, 第二特征向量及后面几个特征向量反映的是短一些波的特征, 前者相关系数比后者高, 说明尺度较大波动的预报性较好。这与滤波结果的分析相一致。

由此可见, 模式对大尺度天气系统的预报能力较强, 而对于较小尺度的天气系统的预报能力要差一些。因此, 在预报时, 可以对模式预报结果进行波谱分析, 滤去预报不好的短波部分, 保留前面预报效果好的长波部分, 合成后作为预报场, 可能会提高整体预报水平。而且在月平均环流场中, 前几个长波的合成就足以反映月平均环流的基本特征了。

我们还试验过在预报前对初始场进行空间波谱分析, 滤去短波部分, 保留前5波, 即长波部分, 再进行月预报。结果(图略)表明, 年平均AC和P值均降低了0.01。可见, 虽然长波部分对预报结果起着决定性的作用, 但由于不同尺度运动之间相互作用的非线性过程, 短波部分对长波部分的变化也有一定的影响, 简单地从初始场滤去短波部分反而会损害预报效果。

5 结论

Nju-P σ M在月尺度环流的预测方面表现出一定的能力, 从1995年12个月的预报情况来看, 尽管包含了较难预报的春夏季个例, 年均月预报的距平相关系数仍可达到0.32, 有一半的月份相关系数超过了0.4, 这与目前国内外的预报水平相近。气候漂移订正和预报结果的线性、抛物线型两种合成方法都对预报结果有明显的改进。月际和年际持续性预报的各项评估都低于动力预报, 但持续性预报较差的月份, 动力预报也相对

较差一些。把模式预报场和实况场进行空间滤波,分为短波部分和长波部分分别求相关系数,表明 1994 年和 1995 年长波部分的年平均相关系数分别为 0.217、0.332,远大于短波部分。对预报场和实况场的 EOF 分析也有同样的结果,可见模式对大尺度天气系统的预报能力较强,而对于中小尺度的天气系统预报能力较差一些。

参 考 文 献

- 1 王绍武主编,气候预测与模拟研究,北京:气象出版社,1993,346pp.
- 2 Yamada, S. M. et al., Dynamical one-month forecast experiments with the JMA global prediction model, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1991, **69**(1), 153~159.
- 3 Jeffrey, L. A. et al., Skill and return of skill in dynamic extended-range forecasts, *Mon. Wea. Rev.*, 1994, **122**, 507~516.
- 4 Van den Dool, H. M., Long-range weather forecast through numerical and empirical methods, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 1994, **20**, 247~270.
- 5 钱永甫, A five layer primitive equation model with topography, 高原气象, 1985, **4**(2), (suppl.), 1~28.
- 6 钱永甫等,行星大气中地形效应的数值研究,北京:科学出版社,1988,217pp.
- 7 张道民等,月数值天气预报的试验研究,大气科学,1996, **20**(4), 429~438.

Monthly-Scale Dynamical Extended Forecast Experiments Performed with a P- σ Global Numerical Climate Model

Qian Yongfu and Zheng Qiong

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract By using a global climate model of Nanjing University with the P- σ vertical coordinate system (Nju-P σ M), twenty-four monthly forecasts are conducted started from the real time data set at 00:00 UTC. The results of the 500 hPa geopotential height field are assessed and analyzed with the anomaly sign consistency rate (P), the anomaly correlation coefficient (AC) and the root-mean-square error (RMS). It is shown that the Nju-P σ M is somewhat skillful in the monthly forecast. The forecast skill of the model is remarkably enhanced after the climate drift correction and the weighted assemble are made. It is also shown that the dynamical forecasts of the monthly mean 500 hPa heights are obviously better than those of the persistence method. The space filtering and the empirically orthogonal function (EOF) analysis of both the predicted and the observed fields indicate that the dynamical extended forecast of the large scale circulation is much better than that of the meso-scale circulation.

Key words: global climate model; extended forecast; assessment and diagnostics of prediction